

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **10208078 A**

(43) Date of publication of application: **07 . 08 . 98**

(51) Int. Cl.

G06T 15/70
G06T 17/40

(21) Application number: **10002255**

(22) Date of filing: **08 . 01 . 98**

(30) Priority: **08 . 01 . 97 US 97 780388**

(71) Applicant: **MITSUBISHI ELECTRIC INF
TECHNOL CENTER AMERICA INC**

(72) Inventor: **SARA GIBSON**

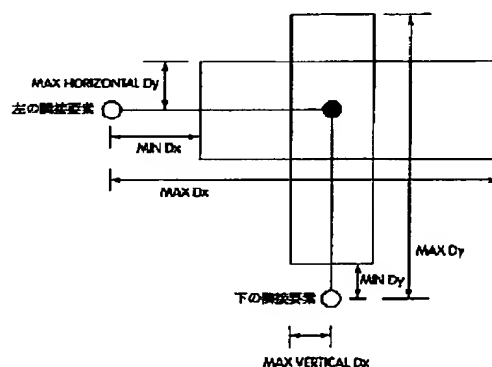
(54) **SYSTEM AND METHOD FOR QUICKLY
TRANSFORMING GRAPHIC OBJECT**

(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To obtain a system and a method which quickly transform a graphic object that efficiently transforms an object that has volume.

SOLUTION: About each element of a graphic object to be transformed, the object is extended or contracted through the movement of a selected element when the object is operated. Later, only when the distance between a moved element and an adjacent element exceeds prescribed maximum or minimum distance, the adjacent element is allowed to move. Because the element is moved only when it must be moved, it does not have to calculate the movement of the element that is not influenced by the movement of the selected element. Because of this, transformation is fast propagated in the volume that is represented by an object to be transformed, the binding conditions of movement are similar to movement that is given by a set of elements connected by a chain, and can efficiently transform an object that has volume.

COPYRIGHT: (C)1998,JPO



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-208078

(43) 公開日 平成10年(1998) 8月7日

(51) Int.Cl.⁶

G 0 6 T 15/70
17/40

識別記号

F I

G 0 6 F 15/62

3 4 0 K

3 5 0 K

審査請求 有 請求項の数14 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願平10-2255

(22) 出願日 平成10年(1998) 1月8日

(31) 優先権主張番号 08/780388

(32) 優先日 1997年1月8日

(33) 優先権主張国 米国 (U S)

(71) 出願人 597067574

ミツビシ・エレクトリック・インフォメイ
ション・テクノロジー・センター・アメリ
カ・インコーポレイテッド

MITSUBISHI ELECTRIC
INFORMATION TECHNO
LOGY CENTER AMERIC
A, INC.

アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケ
ンブリッジ、ブロードウェイ 201

(74) 代理人 弁理士 曾我 道照 (外6名)

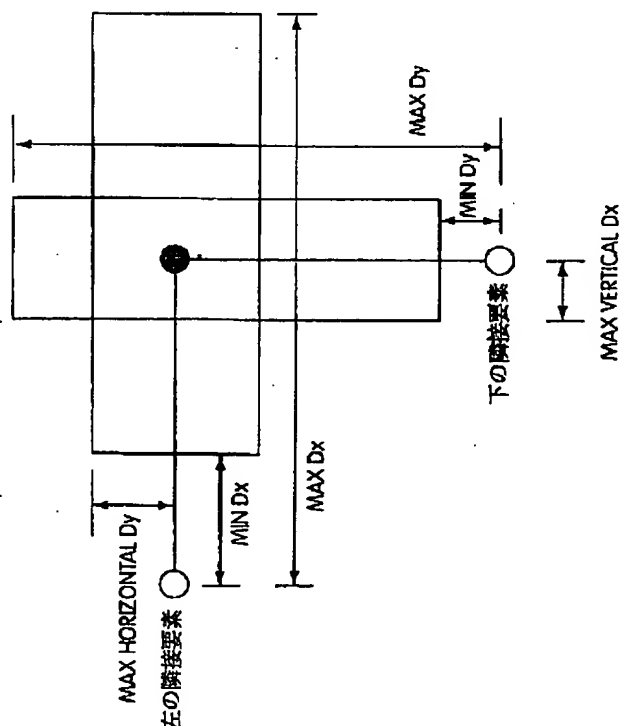
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 図形物体を迅速に変形させるためのシステム及び方法

(57) 【要約】

【課題】 体積のある物体を効率よく変形させる図形物体を迅速に変形させるためのシステム及び方法を得る。

【解決手段】 変形されるべき図形物体の各要素について、物体が操作されるとき、その物体が、選択された要素の運動を通じて伸びたり縮んだりし、その後、動かされた要素と隣接する要素との間の距離が所定の最大あるいは最小の距離を超えた場合に限り隣接する要素が動くようにすることにより、要素は、動かされなければならない場合に限り動かされるので、選択された要素の運動から影響を受けない要素の運動を計算する必要がなくなり、このため、変形されるべき物体によって表される体積の中を変形が急速に伝播し、運動の束縛条件は、鎖の連結された要素の集合が与える動きに似ていて、体積のある物体を効率よく変形させることができる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 他の図形物体とともに表示された図形物体を変形させるためのシステムにおいて、図形物体を体積要素を伴う体積のある物体として特徴づけるためのコンピュータを含む手段と、前記の体積要素のうちの選ばれた1つを選択して動かすために前記コンピュータに結合されているユーザーインターフェースと、前記ユーザーインターフェースに応答して、前記ユーザーインターフェースにより指定された量だけ前記の選択された体積要素を運動させ、その運動の結果として前記図形物体を変形させるための図形物体変形手段と、前記図形物体の変形時に図形物体同士の衝突を検出して防止するための手段と、要素同士の相対的位置をその弾力性に基づいて弛緩させるための弛緩手段と、前記弛緩手段の出力に結合されて、前記の体積のある図形物体を動かし、変形させ、弛緩させた結果を再現するためのディスプレイを含む手段とから成ることを特徴とする図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

【請求項2】 前記図形物体変形手段は、隣接する体積要素を前記の選択された体積要素の運動に対応する距離及び方向に動かすための手段を含むことを特徴とする請求項1に記載の図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

【請求項3】 前記の隣接する体積要素は、前記の所定の体積要素と前記の隣接する体積要素との間の距離が所定の最小／最大距離閾値を超えたときに限って、前記の閾値を超えた量だけ動かされることを特徴とする請求項2に記載の図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

【請求項4】 前記閾値は、前記図形物体が表すべき剛性に応じて設定されることを特徴とする請求項3に記載の図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

【請求項5】 前記の隣接する要素と、更にそれに隣接する体積要素との間の距離が前記所定距離閾値を超えると前記の隣接する要素の運動が前記の更にそれに隣接する体積要素の運動を引き起こすようになっていることを特徴とする請求項3に記載の図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

【請求項6】 前記の変形された図形物体を弛緩させる弛緩手段は、その変形された物体の中での体積要素の位置を調整するための手段を含むことを特徴とする請求項1に記載の図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

【請求項7】 図形物体を変形させるためのシステムにおいて、体積のある物体を体積要素を伴う図形物体として特徴づけるためのコンピュータを含む手段と、前記コンピュータに結合されて、前記体積要素のうち

の、隣接する体積要素に囲まれている選ばれた1つを選択して動かすためのユーザーインターフェースと、前記ユーザーインターフェースに応答して、前記の選ばれた体積要素を前記ユーザーインターフェースにより指定された量だけ動かすことによって前記図形物体を変形させるための手段であって、前記の選ばれた体積要素の運動は、前記の隣接する体積要素のうちの1つ以上の体積要素の運動を生じさせ、その結果として前記図形物体を変形させるための図形物体変形手段と、

10 前記の変形手段の出力に結合されて、前記図形物体を変形させた結果を再現するためのディスプレイを含む手段を有することを特徴とする図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

【請求項8】 前記図形物体変形手段は、隣接する体積要素を前記の選択された体積要素の運動に対応する距離及び方向に動かすための手段を含むことを特徴とする請求項7に記載の図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

20 【請求項9】 前記の隣接する体積要素は、前記の所定の体積要素と前記の隣接する体積要素との間の距離が所定の最小／最大距離閾値を超えたときに限って、前記の閾値を超えた量だけ動かされることを特徴とする請求項8に記載の図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

【請求項10】 前記閾値は、前記図形物体が表すべき剛性に応じて設定されることを特徴とする請求項9に記載の図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

30 【請求項11】 前記の隣接する要素と、更にそれに隣接する体積要素との間の距離が前記所定距離閾値を超えると前記の隣接する要素の運動が前記の更にそれに隣接する体積要素の運動を引き起こすようになっていることを特徴とする請求項7に記載の図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

40 【請求項12】 図形物体を変形させるためのシステムにおいて、体積のある物体を体積要素を伴う図形物体として特徴づけるためのコンピュータを含む手段と、前記コンピュータに結合されて、前記体積要素のうちの、隣接する体積要素に囲まれている選ばれた1つを選択して動かすためのユーザーインターフェースと、前記ユーザーインターフェースに応答して、前記の選ばれた体積要素を前記ユーザーインターフェースにより指定された量だけ動かすことによって前記図形物体を変形させるための手段であって、前記の選ばれた体積要素の運動は、前記の隣接する体積要素のうちの1つ以上の体積要素の運動を生じさせ、その結果として前記図形物体を変形させるための図形物体変形手段と、前記図形物体変形手段の出力に結合されて、変形された図形物体をその弾力性に基づいて弛緩させるための弛緩手段と、

前記弛緩手段の出力に結合されて、前記の変形された図形物体を弛緩させた結果を再現するためのディスプレイを含む手段とを有することを特徴とする図形物体を迅速に変形させるためのシステム。

【請求項13】 体積要素を伴う体積のある物体として特徴づけられる図形物体を迅速に変形させる方法において、

動かされるべき体積要素を選択するステップと、

前記の選択された要素を動かすステップと、

前記の選択された要素が動かされた後に、前記の選択された要素と、隣接して配列されている要素との間の距離を計算するステップと、

前記距離を所定の最小／最大閾値と比較するステップと、

前記最小／最大閾値を超えた場合に限り、前記最小／最大閾値を超えた量だけ、前記の選択された要素に隣接する要素を前記の選択された要素の運動の方向に動かし、その結果として、変形のその体積の全体にわたる伝播の速さは、その体積中の各要素が各変形について高々1回だけ検討され、それが動かされるべきか否か、そして動かされるべきであるならばどの様に動かされるべきか決定するために唯一の隣接要素と比較され、変形が前記の選択された要素から外方に伝播して該最小／最大閾値束縛条件の故になるべく速やかに終息するステップとを有することを特徴とする図形物体を迅速に変形させるための方法。

【請求項14】 前記の計算するステップは、動かされた要素と、それらの前の位置とを指すポイントのリストを維持し、前記の選択された要素の上側の隣接要素であるのか、左側の隣接要素であるのか、下側の隣接要素であるのか、それとも右側の隣接要素であるのかに応じて分類された、動かされる可能性のある隣接する要素のリストを維持し、各要素を前記の選択された要素から右側、左側、上側及び下側の要素リストの順に処理するステップを含んでおり、変形最小／最大閾値が前記の選択された要素と照合され、前記の動かすステップは、照合された要素を前記最小／最大閾値を超えている場合に限り動かすステップを含んでおり、その運動は前記の最小／最大閾値が満たされたときに停止されることを特徴とする請求項13に記載の図形物体を迅速に変形させるための方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、ボクセル (voxel) に基づくシステムに関し、特に、体積のある物体を迅速に変形させるためのシステム及び方法に関する。

【0002】

【従来の技術】外科シミュレーションは、複雑な3次元の解剖学的構造の相互作用型のモデル化及び視覚化を必要とする。例えば、腹部の手術は、複雑な形状と物性と

を有する器官及び組織を探ったり切ったりすることを伴う。組織の変形及び切断をモデル化するには内部構造を表示する必要があるので、体積式物体表示は外科シミュレーションに良く適している。体積式表示は、内部の解剖学的或いは生理学的構造に関する詳しい情報を取り入れることができる。この詳しい情報を使って、内部を均一であると推定して物体の表面を表示するモデルより正確に組織の変形をモデル化することができる。体積式表示は、3次元医療用スキャナによって直接作成されたデータを使用するので、多角形の面を離散的画像データに合うように作ることによってもたらされるエラーを防止することができる。

【0003】体積式物体表示法では、物体は標準化されたデータ要素の離散的3次元アレイとして記憶される。各データ要素は、色や透明度などの視覚特性、或いは、組織の種類や伸縮性などの物性を含む数バイトの情報から構成されることができる。体積式表示法の主な欠点は、物体が数百万個の体積要素から成ることがあることである。この様にデータ要件が大きいために、物体の相互作用を実時間再現し、物理的に写実的なモデル化を行うためにメモリへの記憶及びアクセスに負担がかかることになる。従って、体積のある物体の変形をモデル化するための高速のアルゴリズムが必要である。そのアルゴリズムは、硬い物質、変形可能な物質、弾力性のある物質、及び可塑性の物質を含むいろいろな材料をモデル化し得るものでなければならない。また、そのアルゴリズムは、方向によって異なる材料特性を有する筋肉等の異方性材料をモデル化できるべきである。

【0004】背景的情報として、関連のある基本技術が3つある。それは、ボリューム・グラフィックス、物理学に基礎を置くグラフィックス、及び有限要素モデル化法 (Finite Element Modeling (FEM)) 及びその他の方法を使用する軟組織モデル化法である。“ボリューム・グラフィックス”という題名の論文 (“Volume Graphics”, IEEE, Computer, Vol. 23, 7, pp. 51-64, 1993)、“体積視覚化”という題名の論文 (“Volume Visualization”, CRC Handbook of Computer Science and Engineering, 1996)、“パラメトリック曲線、面、及び体積の3次元操作—変換を行う効率の良いアルゴリズム”という題名の論文 (“Efficient algorithms for 3D scan-conversion of parametric curves, surfaces, and volumes”, Computer Graphics, Vol. 21, 4, pp. 171-179, 1987)、及び“幾何原線の体積標準化要素化”という題名の論文 (“Volume sampled elementization of geometric primitives”, Proceedings Visualization '93, San Jose, CA, pp. 78-84, October, 1993)において、A. カウフマン (A. Kaufman) 他が述べているように、体積のある物体の合成、モデル化、操作、及び再現を処理するいろいろな方針がある。

【0005】ボリューム・グラフィックスにおける従来

の研究は、多角形グラフィックスの伝統的なグラフィックス・パイプラインを、体積データのための新しい方法で置き換える技術の開発を含んでいる。例えば、カウフマンが“体積視覚化”という題名の著作物 (Volume Visualization, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1991) で解説した陰影アルゴリズム、アンチエイリアシング (antialiasing) アルゴリズム及び再現アルゴリズムは、それらの体積版と置き換えられている。これも、L. Sobierajski 及び A. カウフマンにより、“体積光線トレーシング”という題名の論文 (“Volume

10 tratic ray tracing”, proc. Volume Visualization Symposium, Washington, DC, pp. 11-18, 1994) と、前記の参考文献 “October 1993 Proceedings Visualization” とで論じられている。

【0006】規則的体積の体積再現のための新しいアルゴリズムとハードウェア装置とが、H. Pfister により彼の哲学博士論文 (Ph. D. Thesis, Suny At Stony Brook, Aug. 1996) で解説され、P. Lacroute 及び M. Levoy により“ビューイング変換のシェアワープ因数分解を使用する高速体積再現法”という題名の論文 (“Fast

20 volume rendering using a shearwarp factorization of the viewing transform”, proc. SIGGRAPH, Computer Graphics, pp. 451-457, 1994) で解説され、また G. Knittle により“体積再現のためのスケーラブル・アーキテクチャ”という題名の論文 (“A scalable architecture for volume rendering”, Computer and Graphics, Vol. 19, No. 5, pp. 653-665, 1995) で解説されている。S. Gibson により“ボクセルに基づく物体の体積再現、視覚化、触覚探索、物理的モデル化を越えて”という題名の著作 (“Beyond Volume Rendering, Visuali

30 zation, Haptic Exploration, and Physical Modeling of Voxel-Based Objects” in Visualization in Scientific Computing, eds. R. Scatini, J. Van Wijk, and P. Zanarini Springer-Verlag, pp. 10-24, 1995) で解説され、また R. Avila, L. Sobierajski により“体積視覚化のための触覚相互作用法”という題名の著作 (“A Haptic Interaction Method for Volume Visualiz

40 ation”, Proc. Visualization '96, pp. 197-204, 1996) で解説されているように、近頃、ボリューム・グラフィックスで、体積のある物体での触覚相互作用と物体相互作用の物理的に写実的なモデル化とを含む物体操作が注目されている。

【0007】グラフィックスの世界では物体の相互作用の物理的に写実的なモデル化への興味も高まりつつある。それは、物体の衝突の検出と、衝突する物体同士のエネルギー及び運動量の移転との両方を含んでおり、それらは、剛体表示の実時間相互作用のために扱われている問題である。B. Mirtich, J. Canny の“剛体のインパルスに基づくシミュレーション” (“Impulse-based

simulation of rigid bodies”, proc. 1995 Workshop on Interactive 3D Graphics, pp. 181-188, April, 1995)、D. Baraff の“非貫通剛体の動的シミュレーションのための分析的方法” (“Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies”, (proc. SIGGRAPH), Computer Graphics, Vol. 24, pp. 19-28, 1989)、及び上記のGibsonの論文を参照されたい。

【0008】軟組織モデル化に関して、有限要素モデル化法 (finite Element Modeling (FEM)) を用いて複雑な材料をモデル化することができる。要素ノードを慎重に選択し、各ノード点での材料特性を正確に知れば、複雑な機械的挙動を正確にシミュレートすることができる。D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, K. Fleischer が“弾性変形可能なモデル” (“Elastically deformable models”, Computer Graphics, Vol. 21, 4, pp. 205-214, July, 1987) で解説し、D. Terzopoulos, K. Waters が“物理的基礎を有する顔面のモデル化、分析、及びアニメーション” (“Physically-based facial modeling, analysis, and animation”, J. Visualization and Computer Animation, Vol. 1, pp. 73-80, 1990) で解説し、また、Y. Lee, D. Terzopoulos 及び K. Waters が“顔面アニメーションのための写実的モデル化” (“Realistic modeling for facial animation”, Computer Graphics (proc. SIGGRAPH), pp. 55-62, 1995) で解説しているように、FEMは顔面の皮膚及び筋肉層をモデル化するために使用されている。D. Chenは骨格筋肉モデル化について“それを吸い上げる、有限要素法を使用する筋肉の生体力学的基礎を有するモデルのコンピュータ・アニメーション” (“Pump it up, computer animation of a biomechanically based model of muscle using the finite element method”, PhD thesis, Media Arts and Sciences, MIT, 1991) で解説をしている。更に、肝臓のモデル化が Cotin 他によりバイオームド・ブイス'96 (Biomed Vis '96) で解説され、目のモデル化が I. Hunter, T. Doukoglou, S. Lafontaine及び P. Charette により“目の手術のための遠隔操作顕微外科ロボット及び付随の仮想環境” (“A teleoperated microsurgical robot and associated virtual environment for eye surgery”, Presence, Vol. 2, pp. 265-280, 1993) で解説されている。

【0009】しかし、計算要件の故に、ノード点の数が少なくなればFEMを相互作用アプリケーションに使用することはできない。マルチグリッド法及びモデル分析などの有益なFEM計算削減技術が A. Pentland, J. Williams の“良好な振動：グラフィックス及びアニメーションのためのモード力学” (“Good Vibrations: modal dynamics for graphics and animation”, Computer Graphics, Vol. 23, 3, pp. 215-222, July, 1989) で解説されている。さらに、関連技術が、“幾何計算の動向” (Directions in Geometric Computing, ed. Ralph

Martin) の中の I. Essa, S. Scarloff, A. Pentland の“グラフィックス及び幻影のための物理的基礎を有するモデル化”(“Physically-based modeling for graphics and vision”)、 “情報シャクトリムシ”(“Information Geometers”, U.K., 1993)、及び D. Metaxas, D. Terzopoulos の“密で堅い原線の束縛条件付き動的変形”(“Dynamic deformation of solid primitives with constraints”, Computer Graphics (proc. SIGGRAPH), Vol. 26, 2, pp. 309-312, 1992) に記載されている。しかし、FEMの計算の複雑さは、依然として相互作用型の軟組織モデル化のネックとなっている。

【0010】軟組織をモデル化するために使用されている他の技術は、T. Sedberg 及び S. Parry の“密で堅い幾何モデルの自由形変形”(“Free-form Deformation of Solid Geometric Models”, Computer Graphics (proc. SIGGRAPH) Vol. 22, 4, Aug. 1986, pp. 151-160)、並びに W. Hsu, J. Hughes, H. Kaufman の“自由形変形の直接操作”(“Direct Manipulation of Free-form Deformations”, Computer Graphics (proc. SIGGRAPH), Vol. 26, 2, pp. 177-184, 1992) で解説されている自由形変形を含んでいる。活動的表面のモデル化は S. Cover, N. Ezquerro, J. O'Brien, R. Rowe, T. Gads, E. Palm により“外科シミュレーションのための相互作用により変形可能なモデル”(“Interactively deformable models for surgery simulation”, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 13, 6, pp. 68-75, 1993) で解説されており、活動的立方体のためのモデル化法は、M. Bro-Nielsenにより“活動的立方体を用いて行う固体の弾力性のモデル化—シミュレートされた手術への応用”(“Modeling elasticity in solids using active cubes - application to simulated operations”, in Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine proc. CVRMed '95 ed. Nicholas Ayache, pp. 535-541) で解説されている。

【0011】“影響のゾーン”を用いて、与えられたノード点の変位が隣接するノードに及ぼす効果を前もって定める手法が K. Watersにより“3次元顔面表情を動画化するための筋肉モデル”(“A Muscle model for animating three-dimensional facial expression”, Computer Graphics, Vol. 21, 4, pp. 17-24, July, 1987) で解説されている。陰面を用いて軟らかい物質をモデル化する手法が M. Debrun, M. P. Gascuel により“陰面での軟らかい物質の動画化”(“Animating soft substances with implicit surfaces”, Computer Graphics (proc. SIGGRAPH), pp. 287-290, 1995) で解説されている。これらの手法は、それらの速さの故に有益ではあるけれども、複雑な組織に対しては精度が限られている。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】物体の変形について要約すると、体積のある物体には多数の要素があるため

に、物理的に写実的な物体の変形をモデル化する相互作用型アプリケーションに大きな問題が課されることになる。1つの解決策は、割合に分解能の低いグリッドでFEM計算を実行することである。しかし、それは、医療用スキャナにより作られる高分解能データを利用するものではない。従って、体積のある物体を変形させる計算効率の良い方法は今のところ存在しない。

【0013】この発明は上述した点に鑑みてなされたもので、体積のある物体を効率よく変形させることができる図形物体を迅速に変形させるためのシステム及び方法を得ることを目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】この発明に係る図形物体を迅速に変形させるためのシステムは、他の図形物体とともに表示された図形物体を変形させるためのシステムにおいて、図形物体を体積要素を伴う体積のある物体として特徴づけるためのコンピュータを含む手段と、前記の体積要素のうちの選ばれた1つを選択して動かすために前記コンピュータに結合されているユーザーインターフェースと、前記ユーザーインターフェースに回答して、前記ユーザーインターフェースにより指定された量だけ前記の選択された体積要素を運動させ、その運動の結果として前記図形物体を変形させるための図形物体変形手段と、前記図形物体の変形時に図形物体同士の衝突を検出して防止するための手段と、要素同士の相対的位置をその弾力性に基づいて弛緩させるための弛緩手段と、前記弛緩手段の出力に結合されて、前記の体積のある図形物体を動かし、変形させ、弛緩させた結果を再現するためのディスプレイを含む手段とから成ることを特徴とするものである。

【0015】また、前記図形物体変形手段は、隣接する体積要素を前記の選択された体積要素の運動に対応する距離及び方向に動かすための手段を含むことを特徴とするものである。

【0016】また、前記の隣接する体積要素は、前記の所定の体積要素と前記の隣接する体積要素との間の距離が所定の最小/最大距離閾値を超えたときに限って、前記の閾値を超えた量だけ動かされることを特徴とするものである。

【0017】また、前記閾値は、前記図形物体が表すべき剛性に応じて設定されることを特徴とするものである。

【0018】また、前記の隣接する要素と、更にそれに隣接する体積要素との間の距離が前記所定距離閾値を超えると前記の隣接する要素の運動が前記の更にそれに隣接する体積要素の運動を引き起こすようになっていることを特徴とするものである。

【0019】また、前記の変形された図形物体を弛緩させる弛緩手段は、その変形された物体の中での体積要素の位置を調整するための手段を含むことを特徴とするも

のである。

【0020】また、他の発明に係る図形物体を迅速に変形させるためのシステムは、図形物体を変形させるためのシステムにおいて、体積のある物体を体積要素を伴う図形物体として特徴づけるためのコンピュータを含む手段と、前記コンピュータに結合されて、前記体積要素のうちの、隣接する体積要素に囲まれている選ばれた1つを選択して動かすためのユーザーインターフェースと、前記ユーザーインターフェースに応答して、前記の選ばれた体積要素を前記ユーザーインターフェースにより指定された量だけ動かすことによって前記図形物体を変形させるための手段であって、前記の選ばれた体積要素の運動は、前記の隣接する体積要素のうちの1つ以上の体積要素の運動を生じさせ、その結果として前記図形物体を変形させるための図形物体変形手段と、前記の変形手段の出力に結合されて、前記図形物体を変形させた結果を再現するためのディスプレイを含む手段を有することを特徴とするものである。

【0021】また、前記図形物体変形手段は、隣接する体積要素を前記の選択された体積要素の運動に対応する距離及び方向に動かすための手段を含むことを特徴とするものである。

【0022】また、前記の隣接する体積要素は、前記の所定の体積要素と前記の隣接する体積要素との間の距離が所定の最小／最大距離閾値を超えたときに限って、前記の閾値を超えた量だけ動かされることを特徴とするものである。

【0023】また、前記閾値は、前記図形物体が表すべき剛性に応じて設定されることを特徴とするものである。

【0024】また、前記の隣接する要素と、更にそれに隣接する体積要素との間の距離が前記所定距離閾値を超えると前記の隣接する要素の運動が前記の更にそれに隣接する体積要素の運動を引き起こすようになっていることを特徴とするものである。

【0025】また、さらに他の発明に係る図形物体を迅速に変形させるためのシステムは、図形物体を変形させるためのシステムにおいて、体積のある物体を体積要素を伴う図形物体として特徴づけるためのコンピュータを含む手段と、前記コンピュータに結合されて、前記体積要素のうちの、隣接する体積要素に囲まれている選ばれた1つを選択して動かすためのユーザーインターフェースと、前記ユーザーインターフェースに応答して、前記の選ばれた体積要素を前記ユーザーインターフェースにより指定された量だけ動かすことによって前記図形物体を変形させるための手段であって、前記の選ばれた体積要素の運動は、前記の隣接する体積要素のうちの1つ以上の体積要素の運動を生じさせ、その結果として前記図形物体を変形させるための図形物体変形手段と、前記図形物体変形手段の出力に結合されて、変形された図形物

体をその弾力性に基づいて弛緩させるための弛緩手段と、前記弛緩手段の出力に結合されて、前記の変形された図形物体を弛緩させた結果を再現するためのディスプレイを含む手段とを有することを特徴とするものである。

【0026】また、この発明に係る図形物体を迅速に変形させるための方法は、体積要素を伴う体積のある物体として特徴づけられる図形物体を迅速に変形させる方法において、動かされるべき体積要素を選択するステップと、前記の選択された要素を動かすステップと、前記の選択された要素が動かされた後に、前記の選択された要素と、隣接して配列されている要素との間の距離を計算するステップと、前記距離を所定の最小／最大閾値と比較するステップと、前記最小／最大閾値を超えた場合に限って、前記最小／最大閾値を超えた量だけ、前記の選択された要素に隣接する要素を前記の選択された要素の運動の方向に動かし、その結果として、変形のその体積の全体にわたる伝播の速さは、その体積中の各要素が各変形について高々1回だけ検討され、それが動かされるべきか否か、そして動かされるべきであるならばどの様に動かされるべきか決定するために唯一の隣接要素と比較され、変形が前記の選択された要素から外方に伝播して該最小／最大閾値束縛条件の故になるべく速やかに終息するステップとを有することを特徴とするものである。

【0027】また、前記の計算するステップは、動かされた要素と、それらの前の位置とを指すポイントのリストを維持し、前記の選択された要素の上側の隣接要素であるのか、左側の隣接要素であるのか、下側の隣接要素であるのか、それとも右側の隣接要素であるのかに応じて分類された、動かされる可能性のある隣接する要素のリストを維持し、各要素を前記の選択された要素から右側、左側、上側及び下側の要素リストの順に処理するステップを含んでおり、変形最小／最大閾値が前記の選択された要素と照合され、前記の動かすステップは、照合された要素を前記最小／最大閾値を超えている場合に限って動かすステップを含んでおり、その運動は前記の最小／最大閾値が満たされたときに停止されることを特徴とするものである。

【0028】

【発明の実施の形態】以下、この発明について説明する。物体を効率よく変形させるという課題を解決するために、体積のある物体を迅速に変形させるためのボクセルに基づくシステムは、変形されるべき図形物体の各要素について次のようにして単純な変形計算を実行する。即ち、物体が操作されるとき、その物体は、選択された要素の運動を通じて伸びたり縮んだりし、その後、動かされた要素と隣接する要素との間の距離が所定の最大あるいは最小の距離を超えた場合に限って隣接する要素が動くようにする。従って、要素は、動かされなければ

ならない場合に限って動かされるので、選択された要素の運動から影響を受けない要素の運動を計算する必要がなくなる。このため、変形されるべき物体によって表される体積の中を変形が急速に伝播し、運動の束縛条件は、鎖の連結された要素の集合が与える動きに似ている。

【0029】図形物体の変形は、原データの分解能を使用するけれども、変形されるべき図形物体の各要素について割合に単純な計算を実行する3次元チェーンメール・アルゴリズム (the 3D ChainMail algorithm) と呼ばれる特別のアルゴリズムによって得られる。上で言及したように、物体が操作されるとき、隣り合う要素間の最大及び最小の許容距離についての条件を満たすために物体は伸びたり縮んだりする。各要素の運動は、それに最も近い隣の要素の位置のみに依存するので、変形は、変形されるべき物体の体積の中を急速に伝播することができる。運動についての束縛条件は鎖の連結された要素の集合についてのそれと同様であるので、このアルゴリズムは3次元チェーンメール (3D Chain Mail) と呼ばれている。

【0030】もっと詳しく言うと、3次元チェーンメール・アルゴリズムは、連結されている要素の大きなアレイから成る物体を変形させるためのアルゴリズムである。連結されている鎖と同様に、1つの要素が動くとき、その隣の要素は前記の最大距離又は最小距離に達する毎に動くことになる。例をあげて説明する。1要素が選択されて右へ動かされたとき、右側の隣接要素までの最小距離又は左側の隣接要素までの最大距離に達すると、隣接するリンクは前記の選択されたリンクとともに動く。

【0031】この様に、物体の1要素が引っ張られ或いは押されると、隣接するリンクがその構造の中の弛みを吸収することによってその運動を吸収する。2要素間のリンクがその限度まで引き伸ばされ或いは押し縮められると、割合に弛みのあるシステムでの変位は局所的な変形をもたらすだけであるが、既に限度まで押し縮められ或いは引き伸ばされている物体での変位はその物体全体の運動を生じさせる。3次元チェーン・アルゴリズムでは、変形されるべき物体の体積要素はそれに最も近い隣の要素に (3次元では6個の隣接要素に、2次元では4個の隣接要素に) 連結されている。鎖のリンクと同じく、隣接要素は、要素間の距離についての束縛条件が破られる場合に限って、与えられた要素の運動に対して反応する。リンクの長さに関する束縛条件を変更することによって、剛体及び変形可能な物体の両方をモデル化することができる。

【0032】1実施の形態では、体積のある物体を迅速に変形させるための相互作用システムは次に列挙する5個の主要なサブシステムから成る。即ち、1) 体積のある物体の選択及び制御を監視する相互作用型制御ループ、2) 選択された要素が動かされたときに物体を引き

伸ばし或いは縮めるアルゴリズム、3) 相対的要素間距離を調節してシステムのエネルギーを最小にする弾性弛緩アルゴリズム、4) 衝突を検出して物体同士の相互貫通を防止する衝突検出、及び5) 視覚フィードバックのための変形された物体の再現。

【0033】この実施の形態では、物体要素データ構造は、物体のサイズ、その種類又は種別、物体の要素を指すポインタ、並びに、物体全体にわたって一定であると前提される変形及び平衡の限度から成る。体積要素データ構造は、要素の色 (r、g、b)、位置ベクトル (x、y、z) 及び最も近い6個の (上、下、前、後ろ、左、及び右の) 隣接要素を指すポインタから成る。付加的データ構造は、衝突が検出された後或いは許容されない物体形態に達した後に高速の逆戻りを行わせるために、動かされた要素の前の位置を記録している。

【0034】システムは2つの段階から成る。即ち、データ構造を読み込んで初期化する初期化段階と、ユーザーの入力を連続的に監視し、それに応答するX-Yイベント制御ループとから成る。物体の中の要素を選択したり選択解除したりするためにボタンのクリック及びリリースが使用される。要素が選択されると、その選択された要素の変位をマウスの運動が制御する。もし所望の変位の結果として、物体の状態が他の物体又は仮想空間の境界との衝突に起因して許容不能の状態となったならば、所望の位置に向かって許容可能な最大の変位が実現される。ユーザーインターフェースは、変形パラメータ及び弾性パラメータの変化、再現エンジン、並びにセッションの終了も監視する。

【0035】リンクシステムを使用する結果として、物体の変形をモデル化する速度が数桁向上する。これは、3次元チェーン・アルゴリズムの3つの主要な特徴により達成されるものである。第1に、選択された要素の各運動について、変形は、全ての隣接束縛条件が満たされるまでその選択された要素から外方へ向かって隣接要素に伝播するに過ぎない。外辺の隣接要素の束縛条件が破られないならば、伝播は停止する。従って、検討する必要のある要素以外の要素は決して検討されない。

【0036】第2に、3次元チェーンメール・アルゴリズムを使用するときには、選択された要素の各運動について新しいシステムの形態を計算するために各要素をせいぜい1回しか考察する必要がある。それは、変形時に考察される要素の配列の故である。最後に、選択された要素の各運動について、各隣接要素の変位を唯一の隣接要素の新たに調整された位置から計算することができる。

【0037】この発明のこれらの特徴及びその他の特徴は、図面と関連させて下記の詳細な説明を考察すると良く理解できる。図1を参照すると、コンピュータ端末10はスクリーン12を備えており、これに体積要素から成る体積のある物体14が描かれており、要素16、1

8、20、22、24は体積要素の例である。要素16は動かされるべき体積要素であり、要素18-24は、それぞれ、直ぐ左の隣接要素、直ぐ右の隣接要素、直ぐ上の隣接要素、及び直ぐ下の隣接要素である。内部の要素の運動によって物体14を変形させることが決定されると、要素16が破線の円30で指示されている位置へ向かって方向28'に動くようにマウス26は要素16を選択してほぼ所望の方向28に移動する。その結果としての物体14の変形が図2において物体14'により示されている。

【0038】これがどの様に達成されるかが図3に示されている。この図で、動かされた要素（ここでは30の所に示されている）と、それに最も近い隣接要素（即ち要素18、20、22及び24）との間の距離が所定最大距離を超えたときに限って隣接要素が動かされる。従って、要素18-24は、要素30からの距離dleft、dright、dtop、dbottomが或る最大限度を上回り、或いは或る最小限度より下回る場合に限って動かされる。

【0039】この様な運動の結果が図3に略図示されており、ここで、正方形のドット又は対応する格子の線の交点として示されている要素16は、上方且つ右方へ動かされ、この動かされた要素の運動は隣接要素を図示のように移動させる。移動と、その後の歪みとは、最小又は最大距離を超えたか否かを基準として、隣接要素毎に行われることに注意しなければならない。図から明らかに分かるように、隣接要素の運動によって物体全体が変形し、一番下の絵から分かるように、選択された内部要素の運動を通じて物体全体が変形する。

【0040】図5を参照すると、リンク付きチェーンとの類似がよく分かる。中心44及び46を有する2つのリンク40及び42が距離dだけ離れているとすると、リンク40を右へ押せば中心44は中心46へ向かって移動する。リンク40を押すこの動作は太い矢印48で示されていて、それはリンク40を押す側のリンクとする。与えられた最小閾値Tminで、リンク42は矢印50で示されているように右へ移動し、リンク50は押される側のリンクとなる。この様に、dがTminより小さくなって最小閾値条件が満たされると、押される側のリンクが移動する。引っ張る操作では、リンク42は太い矢印52の方向に引っ張られる。すると、或る点でdは最大閾値Tmaxより大きくなる。この閾値を超えると、リンク40は矢印54の方向に移動する。

【0041】この様に、1リンクの運動は、例えば、Tmin又はTmaxを越えた場合に限って隣のリンクに影響を及ぼす。要素の運動は、所望の運動の説明並びに変形速度及び特性の説明の両方においてリンクの運動と同等であって、Tを定義することにより、物体の変形をその物体のスチフネス又は剛性に関して特徴づけることができる。その結果として、軟らかい物体及び堅い物体に異なる変形特性を与えることができる。

【0042】次に図6のA-Dを参照すると、動かされる要素（この場合には要素70）がそれに隣接する要素にどの様に影響を及ぼすかが図解されている。図6のAから分かるように、要素70が選択される。図6のBで、要素70は位置70'に動かされ、その影響がその直ぐ近隣の要素72、74、76、及び78に及ぶ。しかし、これらの隣接要素（例えば76）の運動には、その隣接要素82、84、及び86がある。そのために、例えば86等のさらに他の要素が動かされ、その結果として図示のように他の要素を考慮することになる。

【0043】図6のA及びBを参照すると、変形される物体の相対的剛性又は変形能に種々の制約条件を課すことができることが分かる。例えば、図7のA及びBに示されているように、割合に軟らかい材料では、矢印90の方向の要素の運動は、物体92の中に大きな局所的変形を生じさせるけれども、選択された点から遠く離れた要素にはごく僅かな変形を生じさせるに過ぎない。

【0044】図8のA及びBを参照すると、完全な剛体96では、矢印90の方向の運動は局所的変形を全く生じさせない。むしろ、ここでは破線の箱90'で描かれている原位置から位置96'へ物体が移動するように全ての要素が動かされる。

【0045】中間の例として、図9のAに示すように、半剛体98が矢印90の方向に動くすると、図9のBから分かるように、物体98'は局所的領域100で僅かに歪むけれども、全体として或る程度変形するとともに点線の箱90'で描かれているように移動もする。

【0046】分かることは、物体の変形は内部の要素の移動のみによるのではなくて、物体の剛性又は変形能で表される特性にもよるということである。この剛性又は変形能を、距離についての最小又は最大制約条件によって一義的に決定することができる。

【0047】いろいろな材料特性を有する物体を本アルゴリズムがモデル化し得ることが分かる。リンク束縛条件を調整することによって、物体を剛体又は変形可能なものとしてモデル化することができ、また、変形の量を変えることができる。物体の材料は異方性であってもよく、物体は或る方向には他の方向より大きく変形するものであってもよい。3次元チェーンメール・アルゴリズムは、非凸状の物体を含む随意的形状の物体を変形させ得るものであることに留意しなければならない。

【0048】物体の変形：3次元チェーンメール・アルゴリズム

体積のある物体の要素の数は多いので、物理的に写実的な物体の変形をモデル化する相互作用型のアプリケーションには大きな負担がかかる。1つの解決策は、分解能の割合に低い格子でFEM計算を行うことである。しかし、それは、医療用スキャナにより作られる高分解能データを利用するものではない。この発明では、物体変形システムは、原データの分解能を使用するけれども各要

素に対して割合に簡単な変形計算を実行する3次元チェーンメール・アルゴリズムを使用する。体積が操作されるとき、物体は、隣接要素間の最大許容距離及び最小許容距離に関する条件を満たすように伸びたり縮んだりする。各要素の運動は、それに最も近い隣接要素の位置のみに依存するので、体積の全体にわたって変形が迅速に伝播することができる。運動を束縛する条件は、鎖の連結された要素の集合についての運動束縛条件と同様であるので、このアルゴリズムは3次元チェーンメール・アルゴリズムと呼ばれている。1次元チェーンリンク・システムのリンクとリンクの運動とが図10のA-Cに示されている。

【0049】図11のA及びBは、それぞれ、2次元連鎖の変形していない形と変形後の形との例を示しており、図12、図13及び図14は、チェーンリンクがとることのできる範囲と形態とを説明するために、静止しているシステムと、最大限に圧縮された2次元チェーンリンク・システムと、最大限に引き伸ばされた2次元チェーンリンク・システムとを示している。

【0050】3次元チェーンメール・アルゴリズムでは、体積要素は、それに最も近い6個の隣接要素に連結されている。構造の1つのノードが引っ張られ或いは押されると、隣のリンクは該構造の中の弛みを吸収することによってその運動を吸収する。2ノード間のリンクがその限度まで伸ばされ或いは縮められると、変位はその隣のリンクに移される。この様にして、割合に弛みのあるシステムでの選択された点の小さな変位はそのシステムの局所的な変形を生じさせるに過ぎないけれども、既に限度まで引き伸ばされ或いは縮められているシステムでの変位はそのシステム全体の移動を引き起こす。鎖のリンクと同様に、隣接要素は、要素間の距離に関する束縛条件が破られる場合に限って、与えられた要素の移動に反応する。

【0051】このアルゴリズムでは2種類のリスト、即ち、移動した要素を指すポインタとそれらの前の位置とから成るリスト、並びに、それを後援する要素の上側の隣接要素であるのか、左側の隣接要素であるのか、下側の隣接要素であるのか、それとも右側の隣接要素であるのかによって分類される、動かされるかも知れない候補要素の4つのリストが維持される。各候補要素は、始めに選択された要素が処理され、次に、候補点の右側、左側、上側、及び下側のリストの順で、順番に処理される。要素を処理するために、変形束縛条件がその後援要素と照合される。もし変形限度を超えているならば、その要素は、束縛条件が満たされるまで最小距離だけ動かされる。ユーザーに直接制御されて或いは隣接要素の運動に反応して間接的に、要素が動かされるとき、その要素は、動かされていない隣の要素に対して後援者となり、それらの隣接要素はそれぞれの移動候補リストに加えられる。

【0052】変形限度は次のように定義される。即ち、各要素は、その左側及び右側の隣接要素から $\min D_x$ と $\max D_x$ との間の水平範囲の中で且つその上側及び下側の隣接要素から $\min D_y$ と $\max D_y$ との間の垂直範囲の中に存在しなければならない。これらの限度が材料の伸張及び収縮を規制する。また、各要素は、その水平方向の、左右の隣接要素から $+/-\max H_{or i x D y}$ の範囲内に、且つその垂直方向の、上下の隣接要素から $+/-\max V_{er t D x}$ の範囲内に存在しなければならない。これらの限度が、材料の中で生じる可能性のある剪断の最大量を規制する。これらの限度の定義が図15に示されている。

【0053】3次元チェーンメール・アルゴリズムは次の通りである。

1) ユーザーが選択した要素が動かされるとき、その要素とその旧位置とが動かされた要素のリストに加えられ、その x 、 y 位置が更新され、それに隣接する4つの隣接要素(上側、左側、下側、右側)が、動かされるかも知れない候補要素のリストに加えられる。

2) 候補要素の全てが調べ尽くされ或いはシステムが許容不能となるまで(この場合には、動かされた要素は元の位置に戻され、所望の位置へ向かって、もっと小さな進捗が試みられる)候補要素のリストが順に処理される。候補リストは、右、左、上、下、の順序で処理される。

3) 右候補リストは次のように処理される。即ち、そのリストの第1要素から始まって、そのリストの要素とその後援要素(常にその左側の隣接要素)との間で伸張及び剪断束縛条件がチェックされる。

【0054】もし束縛条件が破られるならば、その要素は、束縛条件が満たされるまで最小距離だけ動かされる。新しい位置は次のように計算される。もし $(x - x_{left})$ が $\min D_x$ より小さければ、 $x = x_{left} + \min D_x$; 或いはもし $(x - x_{left})$ が $\max D_x$ より大きければ、 $x = x_{left} + \max D_x$; もし $(y - y_{left})$ が $-\max H_{or i z D y}$ より小さければ、 $d y = y_{left} - \max H_{or i x D y}$; 或いはもし $(y - y_{left})$ が $\max H_{or i x D y}$ より大きければ、 $d y = y_{left} + \max H_{or i x D y}$; もしその要素が動かされれば、その上側、右側、及び下側の隣接要素がそれぞれの候補リストに加えられる(その要素はその左側の隣接要素に後援されたので、左側の隣接要素を候補リストに加える必要はない)。右側の候補が無くなるまで、各々の右側候補が処理される。

【0055】4) 左候補リストも、左側の要素がその右側の隣接要素によって後援されること、並びに、左側の要素の移動に起因してその下側、左側、及び上側の隣接要素が候補リストに加えられることを除いて、同様に処理される。

5) 上リスト及び下リストも、上側要素及び下側要素が

それぞれそれらの下側要素及び上側要素に後援されること、並びに、上側（又は下側）要素の移動に起因して上側（又は下側）要素だけが正しい候補リストに加えられることを除いて、同様に処理される。

【0056】非凸状の物体については、このアルゴリズムは少し修正されなければならない。非凸状の物体では、動かされる上側（又は下側）要素の右側又は左側の隣接要素が下側（上側）要素を持っていないければ、それは適当な候補リストに加えられるべきである。そのためには、全ての候補リストの全ての要素を処理し終えるために候補リストを2回以上調査しなければならない可能性があることに留意しなければならない。

【0057】要約すると、3次元チェーンメール・アルゴリズムでは、各要素は、始めに選択された要素が、次に右側、左側、上側、及び下側の隣接要素が、順に処理される。要素が処理されるとき、それを後援する側の要素との変形束縛条件がチェックされる。もしそれらの束縛条件が破られなければ、その要素は動かされない。しかし、変形限度が侵されるならば、その要素は、束縛条件が満たされるまで最小距離だけ動かされる。

【0058】このアルゴリズムは次の3つの理由で特に高速である。

- 1) 体積中の各要素は各変形についてせいぜい1回考慮されるに過ぎない。
 - 2) 各要素が動かされなければならないか否か、またどの様に動かされなければならないか決定するために、各要素は唯一の隣接要素（それを後援する隣接要素）と比較される。
 - 3) 変形は選択された点から外方へ伝播し、その伝播はなるべく速やかに終了する。
- これらの理由のうち、1) 及び 3) は、要素を候補リストに加える方法の結果である。また、第2点として、2) は、物体がその体積の全体にわたって一定の変形限度を有するときに行われることを示すことができる。具体的には、物体の変形限度がその体積の全体にわたって一定であるときには各要素は唯一の隣接要素と比較されなければならないに過ぎない。

【0059】3次元チェーンメール・アルゴリズムで *

$$\begin{aligned} A_{R/T}(x, y) \in ([x_{\text{minAR}} - \text{maxVertDx}, x_{\text{maxAR}} + \text{maxVertDx}], \\ [y_{\text{minAR}} + \text{minDy}, y_{\text{maxAR}} + \text{maxDy}]) \\ = ([x_0 + \text{minDx} - \text{maxVertDx}, x_0 + \text{maxDx} + \text{maxVertDx}], \\ [y_0 - \text{maxHorizDy} + \text{minDy}, y_0 + \text{maxHorizDy} + \text{maxDy}]) \\ = ([x_{\text{minAT}} + \text{minDx}, x_{\text{maxAT}} + \text{maxDx}], \\ [y_{\text{minAT}} - \text{maxHorizDy}, A_{\text{top}}(y)_{\text{max}} + \text{maxHorizDy}]). \end{aligned}$$

これも、 $A_{R/T}$ の左側の隣接要素 A_T に関する変形束縛条件を満たす。従って、上候補リストの要素である $A_{R/T}$ を検討するとき、唯一の隣接要素を両方の束縛条件の集合を満たすように検討するだけでよい。下候補リストについても同様のことが言える。

【0063】弾性弛緩

* は、物体がその体積の全体にわたって一定の変形限度を有するときには、各要素を唯一の隣接要素と比較することができる。候補リスト中の各要素の出発位置は、動かされていない隣接要素の束縛条件を既に満たしている。従って、移動候補要素の新しい位置は、動かされた隣接要素にのみ依存する（もし候補が動かされるならば、その隣の動かされていない隣接要素は後に動かされるべきか否かについて検討される）。

【0060】左（又は右）候補リスト中の要素については、移動が検討される前に後援する右側（又は左側）の隣接要素だけが動かされる。従って、左候補及び右候補については、考慮しなければならない隣接要素は1つだけである。上側（又は下側）の隣接要素については、後援する下側（又は上側）の隣接要素と、その左側（又は右側）の隣接要素との両方が検討前に動かされたということがあり得る。しかし、上候補リストからの要素が、それを後援する下側の隣接要素に対する変形束縛条件を満たすならば、その要素は、左側の隣接要素がそれ自身の下側の隣接要素を満たすように前もって置かれていたならば、その左側の隣接要素の束縛条件を自動的に満たすということがここで証明される。

【0061】もし A の上側及び右側の隣接要素が A に関する変形束縛条件を満たすならば、その左側の隣接要素の束縛条件は、それ自身の下側の隣接要素を満足させるように前もって課されていた。もし A の上側及び右側の隣接要素が A に関する変形束縛条件を満たすならば（図5を参照）、次の通りとなる。

$$\begin{aligned} A_R(x, y) \in ([x_0 + \text{minDx}, x_0 + \text{maxDx}], [y_0 - \text{maxHorizDy}, \\ y_0 + \text{maxHorizDy}]) = ([x_{\text{minAR}}, x_{\text{maxAR}}], [y_{\text{minAR}}, y_{\text{maxAR}}]) \\ \text{且つ} \\ A_T(x, y) \in ([x_0 - \text{maxVertDx}, x_0 + \text{maxVertDx}], [y_0 + \text{minDy}, \\ y_0 + \text{maxDy}]) = ([x_{\text{minAT}}, x_{\text{maxAT}}], [y_{\text{minAT}}, y_{\text{maxAT}}]) \end{aligned}$$

【0062】 A_R 、 $A_{R/T}$ の上側の隣接要素は、 A_R に関する変形束縛条件を満たさなければならない。従って、次のようになる。

50 物体のエネルギーが最小となる形状は1つだけである。

対照的に、可塑性の物体は新しい形状で最小エネルギー状態に達することができる。このシステムは、3次元チェーンメール・アルゴリズムの適用と適用との間に処理時間を利用できるときには常にエネルギー弛緩アルゴリズムを適用する。変形について使用されるのと類似する束縛条件を使用して、要素がその隣接要素に対して弾性束縛条件を満たすか否か判定する。もし弾性束縛条件が満たされなければ、その要素の位置は物体のエネルギーを減少させるために調整される。

【0064】衝突検出

要素が動かされる毎に、システムは、システム内で動かされた物体と他の物体との衝突があるか無いか調べる。もし衝突が発生したならば、システムは許容不能であり、動かされた要素はそれらの元の位置に戻される。許容可能なシステムが発見され、或いは最小進行サイズに達するまで、所望の位置に向かう進行のサイズが小さくされる。ここで呈示する例では、物体は視野窓の境界壁と衝突するだけなので、この実施の形態では要素のx及びyの値を簡単に調べて衝突を検出する。このシステムも、上記のGibsonの論文の衝突検出アルゴリズムを用いるもっと複雑な環境についての結果と同様の結果を生じるように実現されている。

【0065】視覚化

現在のシステムでは、実時間視覚フィードバックを行うべく2次元及び3次元の物体を再現するために、オープンGL (OpenGL) に基づく幾つかの技術が使用されている。2次元では、物体の要素は、点として、連結格子線として、或いは、隣り合う要素同士によって画定される四辺形の多角形として表示されていた。3次元では、物体の全ての要素又は表面の要素だけが点として表示されていた。

【0066】1実施の形態では、骨モデルに付着している軟骨組織が変形されるようになっている膝の横断面MRIから得られたこの2次元骨モデルに、要素を物体に固定する能力を使用する。

【0067】高品質体積再現は、数百万個の体積要素の1つ1つが最終的画像に寄与する可能性があるので、低速である。しかし、新しいアルゴリズムとハードウェア装置とは、規則的な体積の相互作用型体積再現の必要性に答え始めている。

【0068】図16～図18は、いろいろな2次元物体の変形を示している。私達は、180×180要素のサイズの物体について満足な変形速度を達成することができた。また、そのシステムは、非凸状の物体と、幾つかの要素の位置が固定されている物体とを変形させることができた。

【0069】図19は、50×50×50のサイズの3次元の立方体の変形を示している。表面の点だけを再現したときには、MIPS B5000プロセッサをXZグラフィックスで利用するSGIインディ (SGI Indy)

で少なくとも毎秒3のフレーム率を達成した。ここで、図20を参照すると、1実施の形態では、ファイルから物体を読み込むことによって物体が置かれる。次にプログラムはユーザー入力ループに入って152からユーザー入力を待つ。カーソルがその物体の上にあるときにマウスのボタンを押すと、カーソルの下にある物体の点が154で選択される。その後156で検出されるようにマウスが動かされると、160で衝突検出が行われながら本変形アルゴリズムが158で適用される。

【0070】物体が選択されないときには、衝突検出が行われながら上記の弾性弛緩アルゴリズムが162で適用され、158及び162の出力の結果として、ディスプレイ161に結合されている164で物体が再現される。衝突検出は在来の技術で達成され得るけれども、弾性弛緩は、変形すると元の形状に向かって動く物体の運動に関連するものである。

【0071】この発明の幾つかの実施の形態と、その修正形及び変形とについて説明したけれども、それは単なる例示であって限定をするものではないことは当業者にとっては明らかなことであるはずである。いろいろな修正形や他の実施例が当業者の範囲内にあり、添付の請求項及びその均等物のみにより限定されるこの発明の範疇に属するものと考えられる。

【0072】

【発明の効果】以上のように、この発明によれば、変形されるべき図形物体の各要素について、物体が操作されるとき、その物体が、選択された要素の運動を通じて伸びたり縮んだりし、その後、動かされた要素と隣接する要素との間の距離が所定の最大あるいは最小の距離を超えた場合に限って隣接する要素が動くようにすることにより、要素は、動かされなければならない場合に限って動かされるので、選択された要素の運動から影響を受けない要素の運動を計算する必要がなくなり、このため、変形されるべき物体によって表される体積の中を変形が急速に伝播し、運動の束縛条件は、鎖の連結された要素の集合が与える動きに似ていて、体積のある物体を効率よく変形させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 体積要素を選択して、それをマウスの運動に応じて動かして体積のある物体を変形させることにより、その物体を迅速に変形させるためのシステムの線図である。

【図2】 選択された体積要素の運動によって変形される体積のある物体を示す図1のシステムの線図である。

【図3】 4つの隣り合う要素までの距離が描かれている図1の体積要素の運動の略図である。

【図4】 2次元の体積のある物体の中心にある選択された要素の運動に起因する該物体の変形と対応するリンクの変形とを要素の変位で表す一連の絵の説明図である。

【図5】 体積要素を右の方へ動かすことのチェーンリンク類推を説明するもので、要素が所定量を超えて変位するまでは隣接するリンクに対して何の影響も及ぼさず、所定量を超えて変位したときに隣接するリンクが動かされることを示す説明図である。

【図6】 1要素の運動に隣接する要素が反応する順序を示すものであり、要素が束縛条件を満たすように動かされるとき、それに隣接する要素は、運動に関して考慮されるべき要素のリストに加えられることの説明図である。

【図7】 グニャグニャのたるんだ体積のある物体の要素を動かすことの効果を示しており、変形されるべき物体は動かなくて、単に内部構造が動くだけであることを示している説明図である。

【図8】 体積のある剛体の中の体積要素を動かすことの効果を示すもので、物体全体が内部変形を伴わずに移動することを示している説明図である。

【図9】 体積のある半剛体の中の要素を動かすことの効果を示すもので、この体積のある物体の内部変形と全体としての運動との両方を示している説明図である。

【図10】 2次元チェーンメール・アルゴリズムのリンク構造の1次元略図であり、動かされる要素とそれに隣接する左側の要素との間の距離が所定値を越えたときだけチェーンが動くことを示している説明図である。

【図11】 2次元リンク装置の中の要素の動きの効果*

*の略図であり、リンクの動きと、対応する変形とを示している説明図である。

【図12】 休止位置にある4つのリンクの集合を示す略図である。

【図13】 最大限に圧縮されている4つのリンクの集合を示す略図である。

【図14】 最大限に拡張されている4つのリンクの集合を示す略図である。

【図15】 ボクセル要素の、左側及び下側の隣接要素に対する相対的移動限度を示す略図である。

【図16】 2次元物体の変形の図であり、この原物体と、その点再現と、格子再現と、陰影付き多角形再現とを示している説明図である。

【図17】 非凸状の2次元物体の変形を示す説明図である。

【図18】 2次元予備物体の変形を示す説明図である。

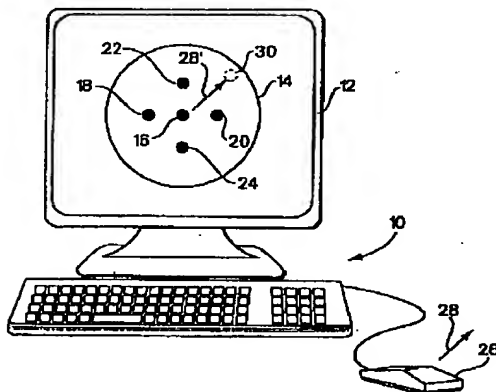
【図19】 3次元の立方体の変形を示す説明図である。

【図20】 本アルゴリズムを利用する体積のある物体を変形させるためのシステムのブロック図である。

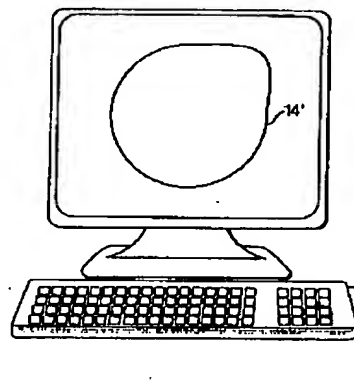
【符号の説明】

10 コンピュータ端末、14 体積のある物体、16、18、20、22、24、30 体積要素。

【図1】



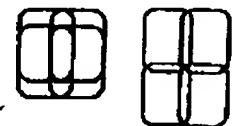
【図2】



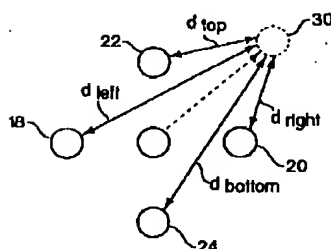
【図12】



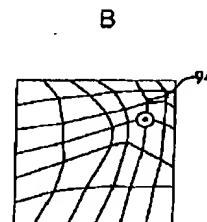
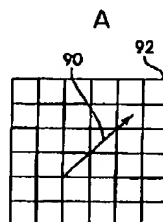
【図13】 【図14】



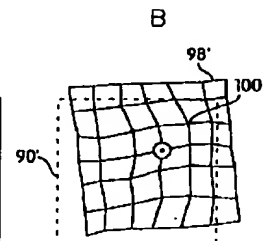
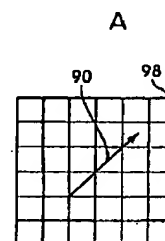
【図3】



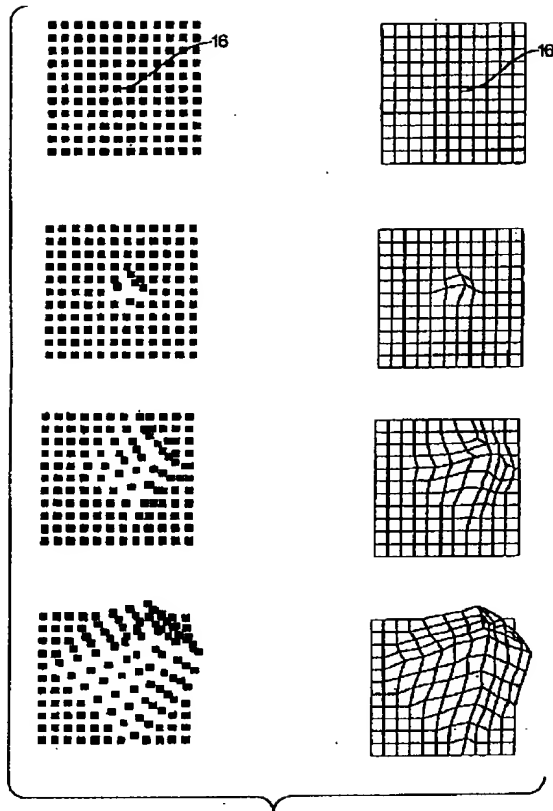
【図7】



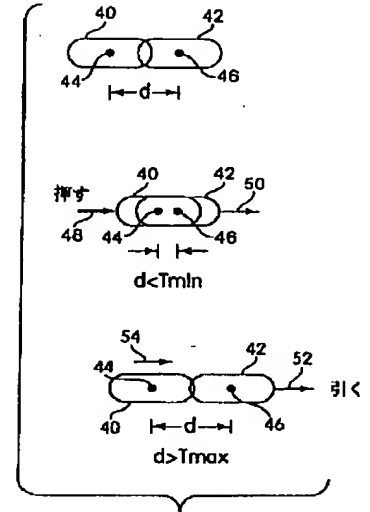
【図9】



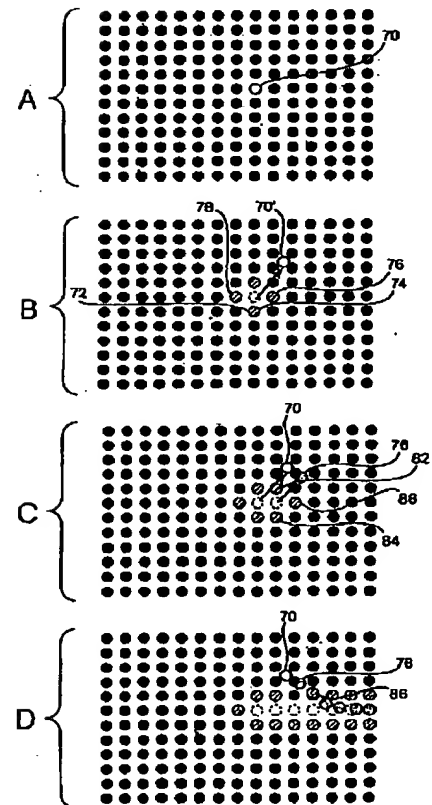
【図4】



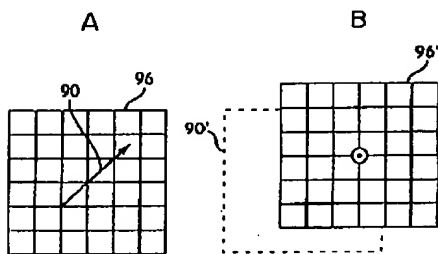
【図5】



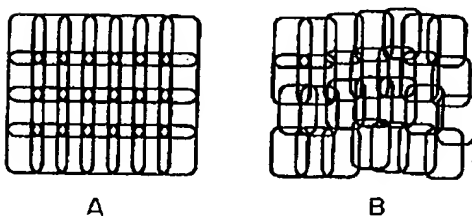
【図6】



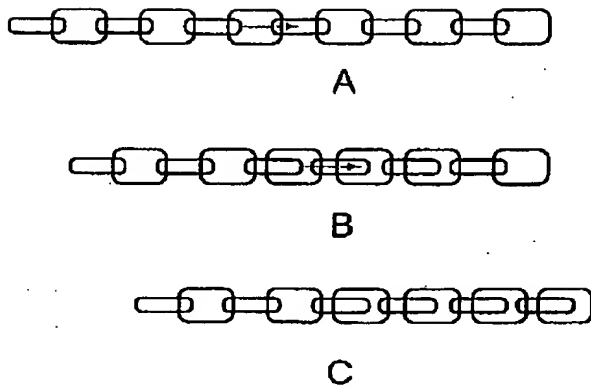
【図8】



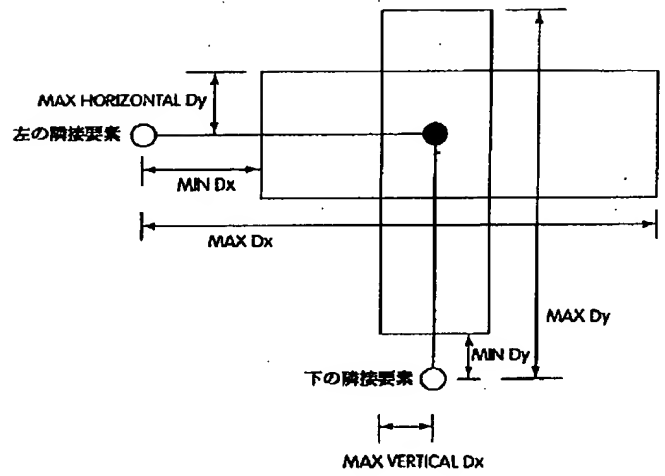
【図11】



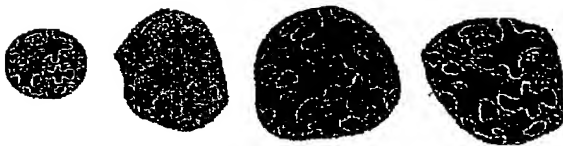
【図10】



【図15】



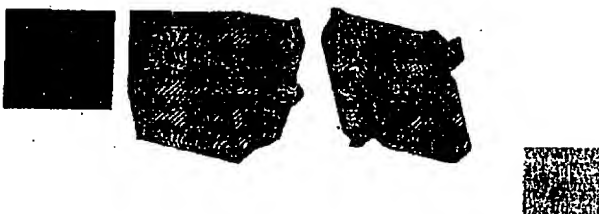
【図16】



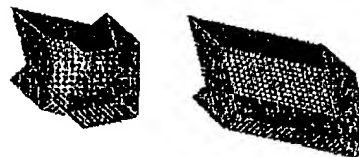
【図17】



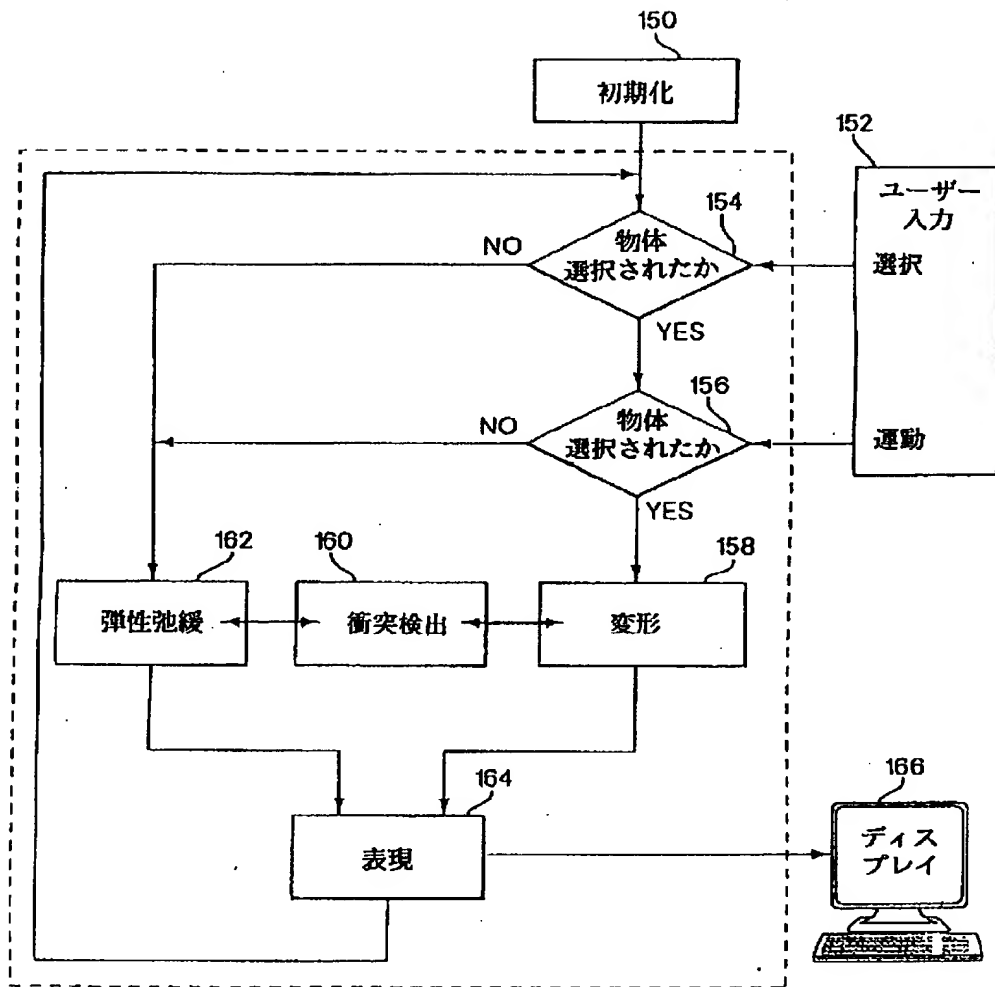
【図18】



【図19】



【図20】



フロントページの続き

(71)出願人 597067574
 201 BROADWAY, CAMBRIDGE,
 MASSACHUSETTS
 02139, U. S. A.

(72)発明者 サラ・ギブソン
 アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ア
 ーリントン、ミスティック・ビュー・テラ
 ス 15

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ **BLACK BORDERS**

☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☐ **FADED TEXT OR DRAWING**

☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.